

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2015-0188

赵传成,姚淑霞,刘君,任志国,达文姣.基于信息熵的天山山区降水时空变化特征.草业科学,2016,33(4):645-654.

Zhao C C, Yao S X, Liu J, Ren Z G, Da W J. The spatio-temporal variations of precipitation based on entropy in Tianshan Mountain. Pratacultural Science, 2016, 33(4): 645-654.

基于信息熵的天山山区 降水时空变化特征

赵传成^{1,2}, 姚淑霞¹, 刘君¹, 任志国¹, 达文姣¹

(1.兰州城市学院,甘肃兰州730070; 2.中国科学院寒区旱区环境与工程研究所
冰冻圈科学国家重点实验室,甘肃兰州730000)

摘要:降水是山区气候中最重要的气象要素之一,其大小及变化直接关系到干旱山区中、下游的生态环境与经济社会的发展,但是,由于技术和地理条件的限制,是难以精确观测的气象要素。本研究采用天山山区 31 个台站和 1960—2008 年间的实测降水资料,应用信息熵方法对天山山区年、季和月的降水变化特征进行分析。结果表明,天山山区降水在时间和空间上均存在变异性,时间变异性表现为信息熵的无序指数(DI)年际变化小于季节变化,季节变化小于月变化。DI 多年变化特征呈现下降趋势;冬季 DI 变化最为显著,夏季最小;冬季北坡降水随高程的增加 DI 变化呈显著增加趋势($P < 0.05$),春、夏和秋季南坡降水随高程的增加 DI 变化呈显著减少趋势($P < 0.05$)。山区月降水 4—9 月逐渐增加,10 月至次年 3 月降水逐渐减少,月降水 DI 的变化与降水变化呈反相特征。在空间上 DI 变化与降水的分布相反,表现为南强北弱,东强西弱,伊犁河谷降水 DI 变化最小。结果证明,DI 方法能够有效地分析山区降水的时空变化特征,为合理开发山区的水资源提供科学依据。

关键词:气候变化;降水变化;信息熵;天山山区

中图分类号:S161.6⁺3

文献标识码:A

文章编号:1001-0629(2016)4-0645-10^{*}

The spatio-temporal variations of precipitation based on entropy in Tianshan Mountain

Zhao Chuan-cheng^{1,2}, Yao Shu-xia¹, Liu Jun¹, Ren Zhi-guo¹, Da Wen-jiao¹

(1.Lanzhou City University, Lanzhou Gansu 730070, China;

2.State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and
Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Precipitation plays a major role in maintaining the water supply in Mountainous area, which directly impacts the development of ecology environment and economic society in the mid and down streams of arid regions. Due to the technical and geographical limitations, one difficult problem in precipitation study is to accurately observe the meteorological factors. The entropy is used in this study to investigate the spatio-temporal variations of precipitation in annual, seasonal and monthly time series from 31 stations located in the Tianshan Mountain during 1960—2008. The results showed that there was an obvious spatial-temporal variability of precipitation in the Tianshan Mountain. The variability of precipitation of annual entropy was less than that of the seasonal, which is in turn less than the monthly. The decreasing trend of annual entropy was significant. In seasons, the variability of entropy was very significant in winter, but not in summer. The variability of entropy exhibited difference between precipitation and elevation for seasons. There was an increasing trend in the pre-

* 收稿日期:2015-04-03 接受日期:2015-12-08

基金项目:国家重大科学研究计划项目(2013CBA01806);国家自然科学基金资助项目(41130638,41361013,31300388,41271078)

第一作者:赵传成(1978-),男,山东曹县人,副教授,博士,主要从事气候变化和人文水资源研究。E-mail:zhao_chch1978@163.com

通信作者:姚淑霞(1980-),女,甘肃灵台人,副教授,博士,主要从事生态水文研究。E-mail:yaoshuxia@163.com

precipitation in northern slope with the elevation increase, while decreasing in southern slope of Tianshan Mountain in spring, summer and fall. The precipitation increased from April to September, and decrease from October to March of next year. The variability of monthly entropy and precipitation were antithetical. The spatial variability of entropy was more radical in southern and eastern slope than northern and western slope. The variability of entropy was minimal in Ili River valley. Obviously, the spatio-temporal variations of precipitation can be depicted by entropy, and supply a scientific basis to the rational development of water resources in Mountain area.

Key words: climate change; variation of precipitation; entropy; Tianshan Mountain

Corresponding author: Yao Shu-xia E-mail: yaoshuxia@163.com

气候变化对全球和区域经济和社会发展已经产生了影响,两极冰川消融加剧、高原冻土退化严重、海平面升高加速等环境变化是人类社会稳定和可持续发展面临的挑战^[1-2]。降水作为气候变化重要的气象要素,其时空分布及变化对水文和生态研究极为重要,由于受复杂地形的影响,这种变化更为显著^[3-5]。降水是山区所有形式的地表水、地下水和冰川积雪等水体的根本补给源,其空间分布对地区的水资源状况、水土流失状况及农业资源的分布状况等都有重要影响。降水空间差异的形成不仅与大气环流的物理过程有关,还受复杂地形影响显著,水汽来源、海拔、坡度、坡向等地形要素不但具有一定的降水形成条件,而且内部水热循环对局地降水产生影响,尤其对山区影响更为显著^[6]。

目前,研究降水时空分布和变化特征的方法很多,主要是以随机统计学理论为基础的相关方法^[7]。降水时间变化特征的研究主要以时间序列分析方法与随机水文学方法为主,如气候趋势法、小波分析法、Mann-Kendall 方法等。栾兆擎等^[8]使用趋势法分析了东北三江平原的气温和降水的变化特征,发现降水呈现弱的减少趋势且不显著。王英舜和贺俊杰^[9]运用小波方法分析了锡林浩特地区 1961—2010 年夏季降水量的变化特征,结果表明夏季降水在不同时间尺度上的周期变化表现不同,在较长时间尺度上振荡平缓,在较短时间尺度上振荡剧烈。康淑媛等^[10]利用 Mann-Kendall 方法研究张掖地区降水变化趋势,结果显示研究区降水量在波动中有上升的趋势,尤其以秋季降水量增多趋势最为明显。降水空间分布特征研究方法主要有地统计学方法、正交函数分解法等。原立峰等^[11]运用地统计学理论、结合 GIS 技术研究了鄱阳湖流域降水空间分布特征,结果表明流域多年平均降水的空间分布整体呈现为由西南向东北,以及由西北向东北梯次递增的趋势。魏义长等^[12]将经验正交函数和地统

计分析有机结合,分析河南省近 51 年降水空间分布特征,得出了河南省雨季降水量空间分布的几种主要类型。

由于降水的随机性与时空变化的复杂性,使得水文与水资源变化也存在很大的随机性和复杂性。熵理论能够定量地分析和评价这种随机性和复杂性,因而被广泛地应用到水文及水资源领域。1972 年,Amoroeho 和 Espildora^[13]将熵理论引入到水文与水资源的研究中,Singh^[14]详细地介绍了熵理论在水文水资源、水利工程及环境等领域的应用。近年来,国内外不少学者对熵理论在水文与水资源领域的应用展开研究,并取得了丰硕的研究成果^[15-19]。作为江、河、湖、海重要的补给源,降水的形成、发生、发展是一种复杂的自然现象,具有很大的随机性和不确定性,其时空变化难以定量描述。信息熵作为随机变量不确定性的度量方法,为研究降水时空变化的不确定性提供了可能,与传统方法相比,信息熵方法能够简便、快速、准确地揭示降水时空变化的随机性和复杂性。

西北干旱山区作为内陆河流域的水源形成和供给区,尽管其面积只占整个流域面积的很小一部分,但却是维系整个流域生态系统和社会经济持续运转的水资源中枢区^[20]。研究表明,新疆 65% 的河流发源于天山山区,其河流径流量占全疆总径流量的 54%^[21-22]。作为各种水体的根本补给源,山区降水的时空分布与变化不仅直接影响区域水资源的总量,也是维系干旱区绿洲经济与社会可持续发展的重要因素。降水是地表植被组成的主要影响因素,在干旱和半干旱区域,降水时间及其大小对植物生长影响更为显著^[23]。山区降水的时空分布较复杂,受地形、山脉走向和水气来源方向等诸多因素的影响,山区气象台站分布稀少,冰雪覆盖的高山区长期观测还是空白。杨莲梅等^[24]将自然正交分解法与数字高程相结合,研究天山山区降雨

量的分布、水汽输送及降水转化率,结果表明,天山西部和中部降水量明显高于天山东部,7月水汽输送最大,1月水汽输送最小,降水转化率的顺序依次为夏季>春季>秋季>冬季。张正勇等^[25]利用一元回归分析法和5年滑动平均,分析天山山区近50年的气温和降水的变化趋势及特征,结果显示冬季升温趋势最为显著,北坡变化较南坡显著;降水夏季增加明显,春季变化最小。天山山区降水垂直变化特征十分显著,时间上也有一定的差异。春、夏、秋季降水随高程的线性关系显著,这种关系南坡表现更为突出^[26]。如何运用现有气象台站观测数据,分析山区降水的时空分布特征,对研究气候变暖背景下干旱区水资源变化和适应未来气候变化带来的影响具有重要意义^[27]。

1 研究区概况及数据资料

1.1 研究区概况

天山山区地处亚欧腹地,呈纬向分布,由一系列山脉、山间盆地和谷地组成。位于中国境内的天山,通常称为东天山,位于39°-45.5°N、73°-96°E(图1),西起中国与吉尔吉斯斯坦边界,东至哈密市以东的星星峡戈壁,东西绵延1700km,宽度一般为250~350km,面积约5.7×10⁵km²,占新疆面积1/3以上。山区平均海拔高度4000m,是南北疆气候的分水岭。天山山区的水汽主要源自西风环流带来的西来水汽,其次是北冰洋的干冷气流(约占1/3)。由于巨大的高度以及独特的山地走势,对西风环流和北冰洋气流起着阻挡和抬升作用,使得山区降水量较为丰富,降水量整体呈现自西向东减少,北坡多于南坡的分布格局。

由于经济和技术条件的制约,天山山区气象台站十分稀疏且分布极不合理,70%的气象台站设在天山南北坡的低山带和山前平原区,冰雪覆盖的中、高山以上地区台站十分稀少^[28]。具有长序列观测的气象台站31个,台站密度为8742km²·站⁻¹,距世界气象组织推荐的温带、内陆和热带的山区的容许最稀密度(100~250km²·站⁻¹)的要求相差甚远。位于天山南坡台站19个,海拔最高的台站为吐尔尕特(3507m),海拔最低的台站为吐鲁番(37m);北坡台站12个,海拔最高的台站为昭苏(1851m),海拔最低的台站为精河(320m)。约60%的台站分布在较宽的天山中段,天山东段次之,天山西段最为稀疏。其中,高程低于1000m台站14个(北坡8个,南坡6个),约占45%;高程1000~2000m的台站14个(北坡4个,南坡10个),约占45%;高程在2000~3000m的台站2个(南坡2个),约占6%;高程大于3000m台站只有1个(位于南坡),约占4%。

1.2 数据来源

尽管常规观测台站空间分布无规则,时间上不连续,且观测精度受地形、风、仪器精度等诸多因素的影响,但测量结果仍被认为是最为可靠的。本研究使用的降水观测台站资料来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)。各个台站建站时间不同,数据时间长度序列不同,为了分析结果的一致性,所有台站数据观测期统一为1960-2008年,数据项为月降水量、气象站点经度、纬度和海拔高度。由于自然条件等因素造成部分台站降水数据存在不同程度缺测,在分析气象要素变化特征等通常将缺失数据的

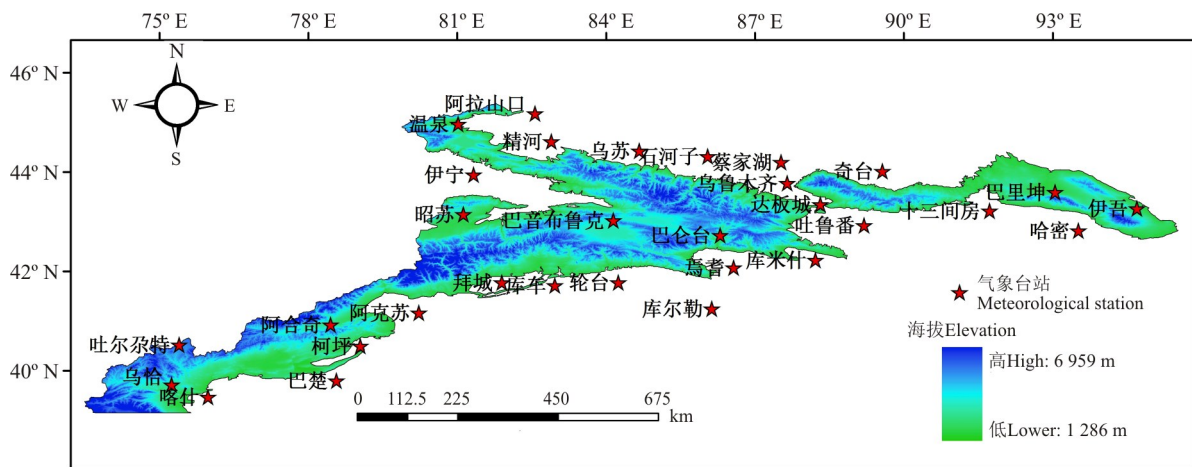


图 1 天山山区气象台站分布

Fig.1 Location of study area and the distribution of meteorological stations in Tianshan Mountain

台站剔除,但在天山山区本身气象台站相对较少,且这些台站又有一定的代表性,如果简单的剔除会为研究山区气候变化特征带来很大的不确定性。为此,对降水数据存在缺失的台站做如下处理:1)剔除在研究期内连续缺失6个月以上的台站。2)数据连续缺失3~6个月的部分台站采用回归订正法进行插补。3)数据缺失1~2个月的部分台站使用附近3个台站加权平均方法进行插补。使用上述方法天山山区共计31个站点。

2 研究方法

熵的概念最早起源于物理学,Shannon于1948年将熵的概念引入信息论中,为解决随机事件的不确定性或信号所含信息量大小的评价方法,通常称为信息熵^[29]。假设随机事件的概率分布函数 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$,信息熵定义为:

$$H(x) = -\sum_{i=1}^n x_i \log_2 x_i \quad (1)$$

式中, $H(x)$ 为熵值, x_i 为发生的概率, n 为序列长度。

熵是用于刻画随机事件发生状态不确定性的定量指标,随机事件的不确定性越大,熵值就越大。一个系统越是有序,变化的不确定性就越小,信息熵就越低,即熵值与不确定性呈正相关关系。因而,信息熵对于信息具的不确定和无序性有较强的刻画能力。降水是一种自然现象,具有很大的随机性和不确定性,用信息熵来度量其时空变异特征具有较强优势。

2.1 分配熵(Apportionment Entropy, AE)

分配熵(AE)用于度量年降水量在各月分配的不均匀性。首先统计某年第*i*月的降水量 $prec_i$ ($i=1, 2, 3, \dots, 12$)和全年的降水量 $prec$,

$$prec = \sum_{i=1}^{12} prec_i \quad (2)$$

然后求降水概率(p_i), $p_i = prec_i / prec$,再用式(1)求分配熵(AE)。

2.2 信息熵无序指数(Disorder Index, DI)

信息熵无序指数(DI)为基于熵的最大可能熵值与实测数据序列计算的熵值的差,降水的空间变异性可以用无序指数描述。计算公式为:

$$DI = \log_2 n - H(p) \quad (3)$$

由于无序指数为最大可能熵与计算熵的差,其度量与熵值相反,即无序指数越大,随机变量的变异性就越大,降水的时空变异性可以通过无序指数来进行相互比较。年降水量在不同月份分布的变化越大,相应

年无序指数DI也就越大。

2.3 天山山区降水变化特征分析

采用天山山区31个台站年、季、月时间序列的降水数据,使用公式(2)计算每个月的降水概率,使用公式(1)计算每个台站年、季、月的信息熵H和分配熵AE。为了更为直接地描述降水时空变化特性,使用公式(3)计算年、季、月的无序指数DI。

3 结果

3.1 月降水时空变化特征

天山山区的31个台站多年平均月降水无序指数DI如图2所示,无序指数DI的分布呈现南强北弱—北强南弱—南强北弱规律。1—4月份,天山南坡无序指数较大,北坡无序指数较小,伊犁河谷无序指数较小特征非常明显。5月份除天山东段无序指数较大和伊犁河谷无序指数较小之外,南北坡无序指数差异较小,可视为变化过渡月份。6—8月份,伊犁河谷无序指数较大,天山西段部分地区无序指数较其它地区偏高。9月份,伊犁河谷无序指数仍然较高,南坡无序指数开始呈增加趋势。10—12月份,无序指数的分布呈现南坡较北坡大,伊犁河谷无序指数较小。

从无序指数的空间分布来看,天山北坡的无序指数除伊犁河谷地带没有明显规律,但与南坡相比,无序指数较小。天山南坡的无序指数整体表现为,随着降水的增加呈现减小趋势,9月份之后随着降水的减少呈增加趋势。伊犁河谷向西敞开,使西来的湿润气流长驱直入,形成较多的降水。6—9月份降水占年降水的30%~40%,降水时空变异大,维持较高的无序指数。形成这种分布特征主要是由于天山南北坡降水存在差异,各月的无序指数也存在一定的差异性。天山降水自西向东逐渐减少,天山北坡的无序指数呈相应的变化趋势,其原因是降水减少导致各月降水变化差异性减小,所以无序指数不是增加而是减小。由于北坡降水变化不大,其无序指数没有明显的变化规律。

3.2 季节降水时空变化特征

季节降水无序指数变化如图3所示。从空间分布来看,春、夏和秋3个季节无序指数南北坡差异显著($P < 0.05$),冬季的无序指数差异不明显($P > 0.05$)。但冬季无序指数较高,变化范围最大,由此来看,虽然天山山区冬季降水较少,但降水变化较为显著。天山南坡的巴轮台冬季无序指数最大,该区域的冬季降水

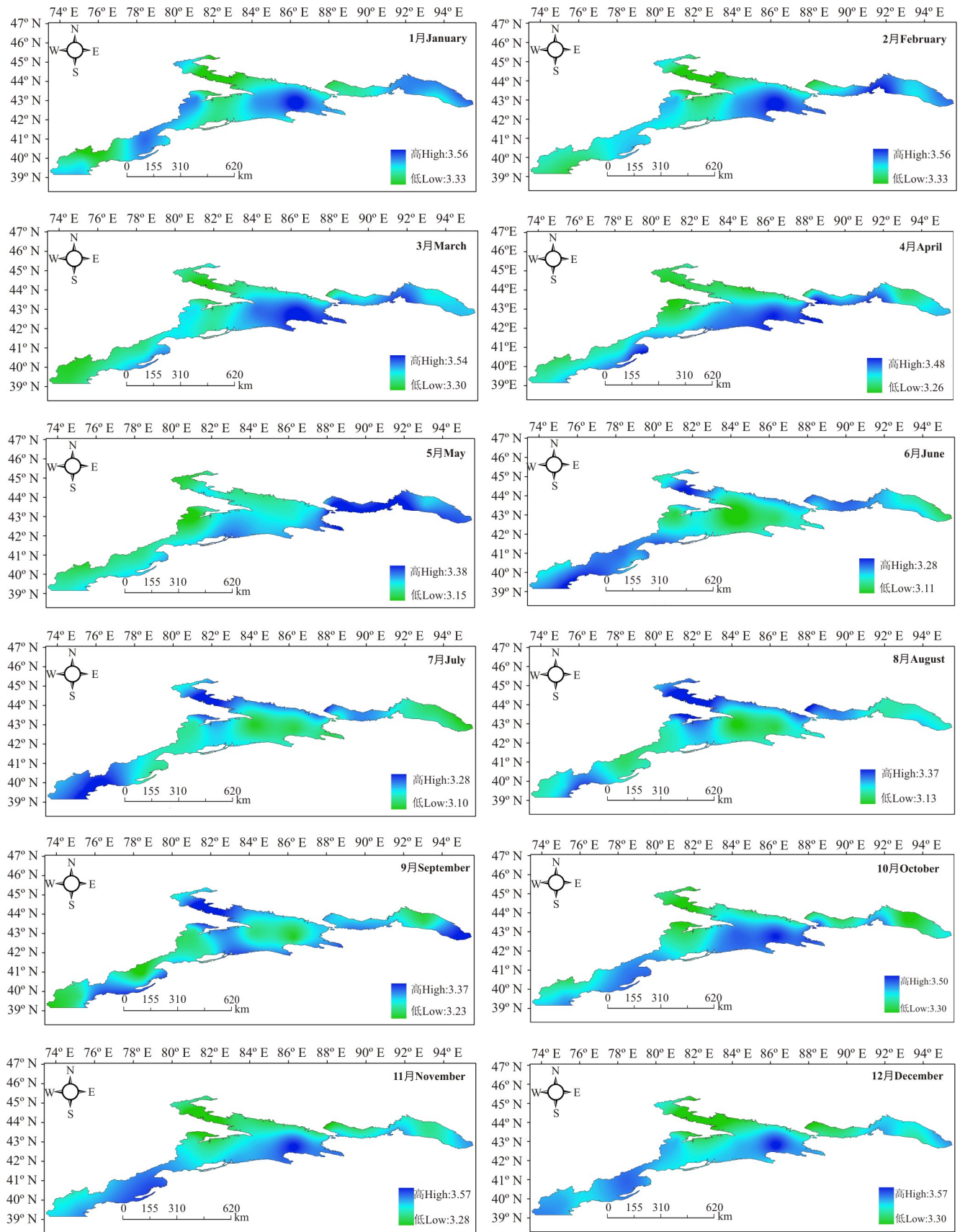


图 2 天山山区 1—12 月降水无序指数空间分布

Fig.2 The distribution of monthly precipitation DI in Tianshan Mountain

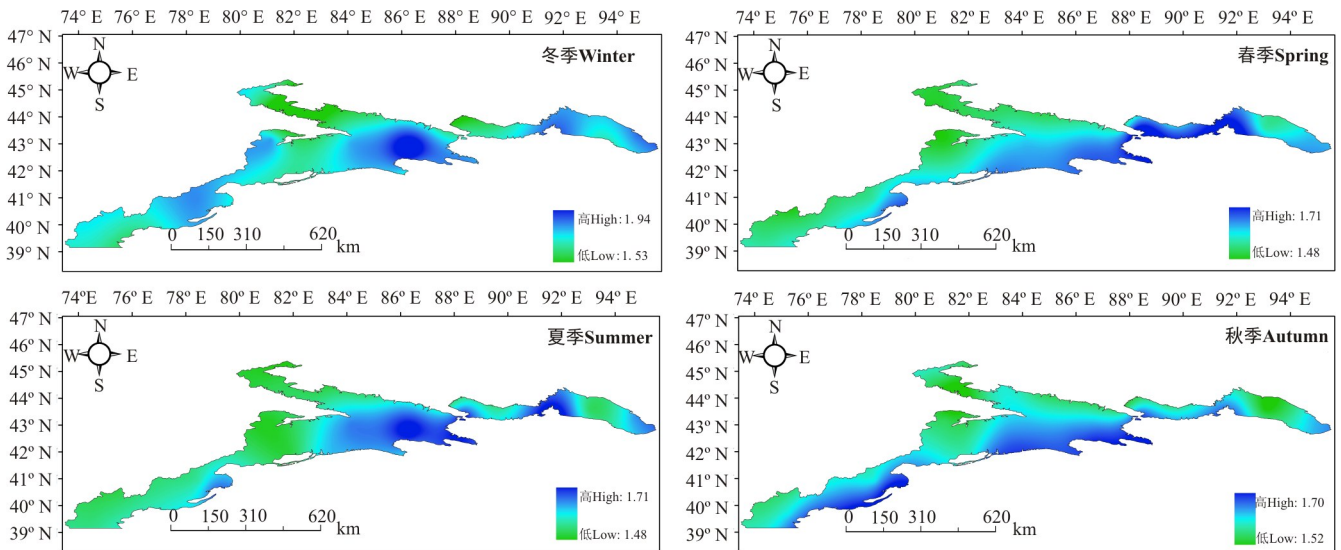


图3 天山山区季节降水无序指数空间分布

Fig.3 The distribution of seasonal precipitation DI in Tianshan Mountain

变化最为突出。伊犁河谷北侧无序指数最小,冬季降水变化不明显。春季随着西风环流强度增强,山区降水明显增加,无序指数也逐渐减小。由于东段受西风气流影响较小,无序指数较大。夏季是山区降水最多的季节,无序指数较低,变化范围最小。天山西段至伊犁河谷一带,无序指数南北差异小,降水变化不明显。天山东段自西向东呈现低—高一低—高的分布格局,这可能与该地区水汽来源复杂有关。秋季随着西风环流强度的减弱,山区降水逐渐减少,无序指数有所增加。天山西段南坡无序指数增加明显,说明其降水变异性增加;东段无序指数呈减少趋势,其降水变化有所减弱但不显著,主要原因是东段降水较小,多年变化不显著。

为了进一步描述天山山区降水变化特征,分析了4个季节无序指数与高程的相关关系(图4),发现冬季降水无序指数与高程显著相关($P < 0.05$),随着高程的增加无序指数呈增大趋势,由此反映出冬季降水高山区较低山区变化显著,这与冬季观测的低山区降水大于高山区一致。春季降水无序指数与高程的关系不显著($P > 0.05$),呈微弱下降趋势,夏季和秋季降水无序指数与高程的关系不显著,但呈微弱上升趋势。

冬季,北坡降水无序指数随高程的增加而迅速增大,显著相关($P < 0.05$),相关系数高达0.85,由此表明,天山北坡冬季降水随着高程的增加,降水差异性急剧增加;南坡降水无序指数与高程的关系不明显。春季与冬季的规律相反,北坡降水无序指数与高程相关不显著($P > 0.05$),降水变化特征不明显;南坡降水无

序指数随高程的增加而迅速下降,相关系数为0.63,表明春季南坡低山区降水变化显著,而高山区降水变率较小。夏秋两季降水无序指数与高程的相关性基本一致,略呈上升趋势但不显著。夏秋两季南北坡的变化也基本相同,南坡降水无序指数随高程的增加而增大,表明南坡高山区降水变化大,低山区降水变化小;北坡降水无序指数随高程的增加而减小,夏季通过了90%的显著性检验,而秋季则通过了95%的显著性检验,由此表明北坡高山区降水变化较小,低山区降水变化显著。

3.3 年降水时空变化特征

为了分析天山山区降水年际变化特征,用每年所有台站的无序指数的均值刻画年降水变化特征,可得天山山区31个台站1960—2008年降水无序指数(图5)。可以看出,年降水无序指数呈现降低趋势,由此表明天山山区年降水变化呈现减小特征。1960—1969年无序指数波动较大,天山山区降水年变化显著。1970—1979年,年降水无序指数迅速下降,1977年最小;1980—1995年,无序指数在一个较小的范围内波动,年降水变化并不明显。虽然1997年无序指数最大,其前期和后期无序指数都处在较小水平,由此说明当年降水异常。2000—2008年,无序指数波动较大,2004年无序指数最小,2007年无序指数偏高,该阶段年降水变化明显。有研究^[30-31]结果显示,在全球变暖的背景下新疆的气候经历了以湿润化趋势为主的变化,并呈现出了从暖干向暖湿转变的态势,天山山区降水无序指数的年变化特征,进一步验证了结论的合理性。

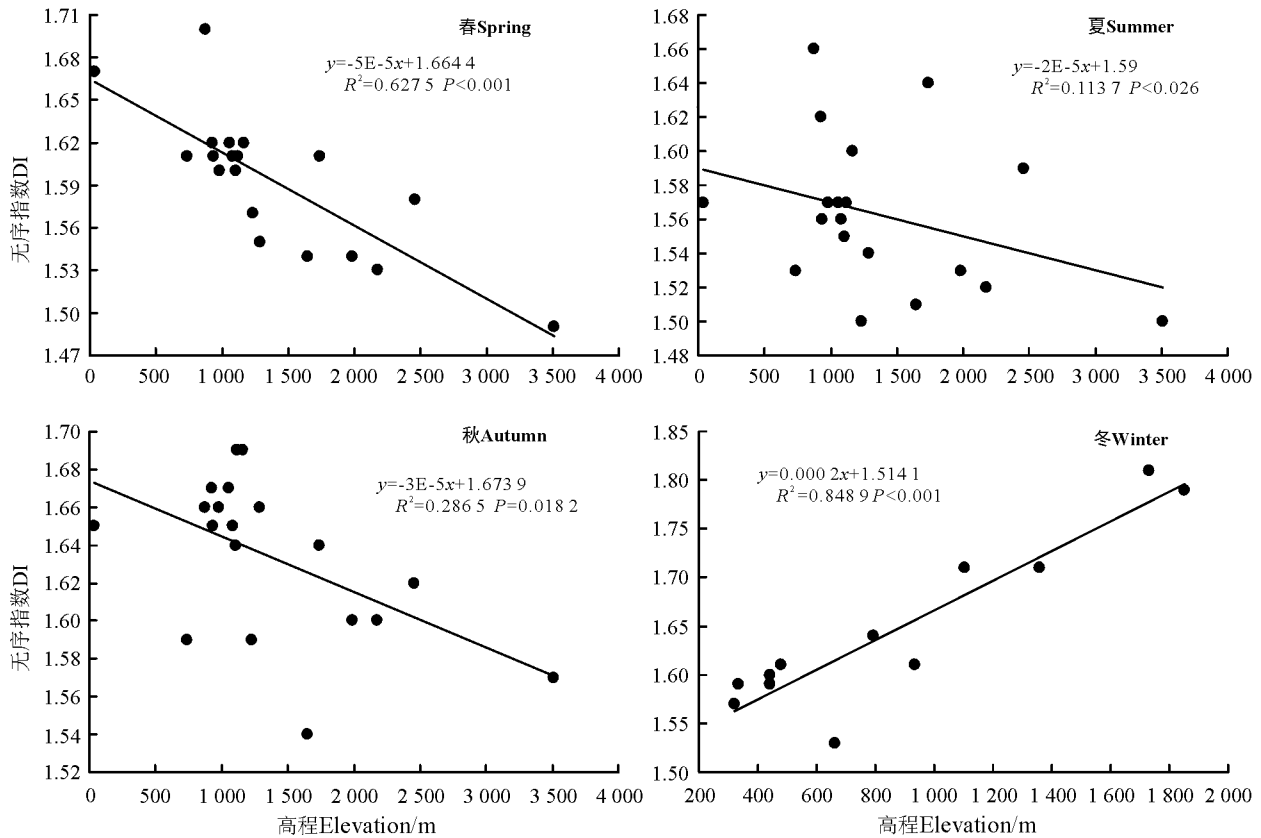


图 4 天山山区季节无序指数与高程相关关系

Fig.4 The relationship between seasonal DI and elevation in Tianshan Mountain

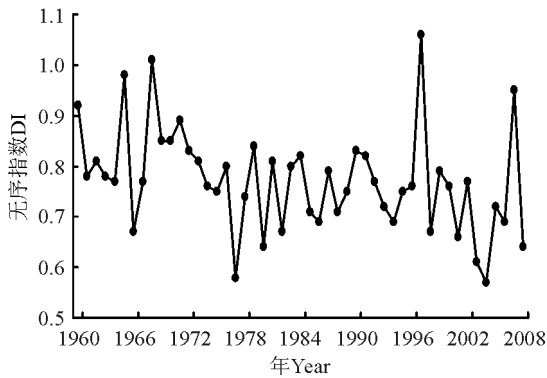


图 5 天山山区逐年降水无序指数

Fig.5 Annual DI of precipitation in Tianshan Mountain

用天山山区所有台站 1960—2008 年的年无序指数的均值刻画山区多年降水空间变化特征(图 6),表明天山山区年降水无序指数空间分布特征显著。整体来看,无序指数呈现北坡小于南坡,东段高于西段分布格局。南疆环塔里木盆地无序指数较大,此区域处在干旱少雨的塔里木盆地周边,又是天山的南坡,西风环流及北冰洋带来的水汽经天山北坡抬升形成降水后,沿天山南坡下降不易形成降水,故而造成此区域年降水量变化差异显著。伊犁河谷地带无序指数最小,这

是由于特殊的地形造成的。伊犁河谷三面环山,呈喇叭状向西敞开,西风环流带来的水汽可长驱直入;地势由西向东逐渐升高,对水汽有一定的抬升作用,容易形成地形降水。因而年降水变化差异较小,无序指数低。

天山东段南北较窄,受西来水汽的影响偏小,无序指数南北差异并不显著。整体呈现中间高两边低的规律。

4 讨论与结论

天山山区降水是众多水体的主要补给源,其大小不仅决定区域水资源总量,也是维系下游绿洲生态系统安全和区域经济可持续发展的重要资源。降水的形成主要由大气环流和地形因素决定,天山山区水汽主要源于西风环流和北冰洋干冷水汽,存在明显的季节特征。杨连梅等^[24]研究表明,天山山区的水汽输送呈正态单峰分布型,1 月份最小,7 月份最大;夏季水汽输送最大,冬季最小,春秋基本相同。降水信息熵的变化随着月降水的增加,降水无序指数逐渐减小,7、8 月份最小;之后,随着降水的减少,无序指数逐渐增加。降水信息熵的季节变化呈现冬季最高,夏季最低,而四季

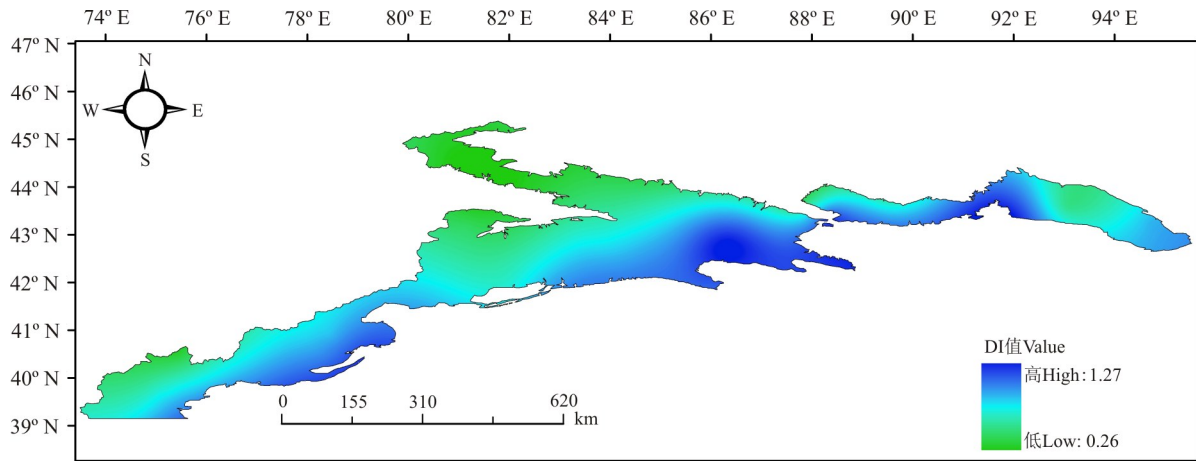


图6 天山山区年降水无序指数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of ID of annual precipitation in Tianshan Mountain

的降水转化率为冬季最小,夏季最大,信息熵的变化与水汽变化具有较好的反相关关系。

天山山区 1960—1985 年降水量呈增加趋势,1985—1999 年,降水量呈现小幅波动,2000—2008 年降水增加趋势显著^[24,27]。年降水的无序指数表明,1960—1985 年呈下降趋势,1985—1999 年,无序指数存在小幅波动;除 2007 年外,2000—2008 年无序指数基本维持较小。其中,1997 年和 1998 年相邻年降水出现最大差值,年降水无序指数也将此刻画出来。

天山水汽从西边界和北边界输入,从东边界和南边界输出,东西方向输送是南北方向输送的 2~3 倍,与西风环流是北冰洋气流 3 倍相吻合。天山东西走

向,使得西来和北来水汽受到高大山体的阻挡而抬升,在北坡形成较多降水。伊犁河谷独特的地形,使得西来水汽可以长驱直入,水汽条件较为充沛,形成天山山区降水高值区。整体而言,北坡年降水与高程的相关关系较南坡显著^[32-33]。降水无序指数空间分布呈现北低南高、西低东高,与水汽来源基本一致。无序指数与高程的关系存在季节差异,冬季北坡降水变化随高程的增加呈增大趋势,相关关系十分显著,南坡降水与高程的关系不明显。春、夏和秋南坡降水随高程的增加呈下降趋势;除春季外,北坡降水变化随高程的增加呈增加趋势。无论年降水和季节降水的无序指数,伊犁河谷都处于一个较低水平。

参考文献 (References)

- [1] 葛全胜,方修琦,郑景云.中国历史时期气候变化影响及其应对的启示.地球科学进展,2014,29(1):23-29.
Ge Q S, Fang X Q, Zheng J Y. Learning from the historical impacts of climatic change in china. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(1): 23-29. (in Chinese)
- [2] 赵传成,王雁,丁永建,叶柏生,姚淑霞.西北地区近 50 年气温及降水的时空变化.高原气象,2011,30(2):385-390.
Zhao C C, Wang Y, Ding Y J, Ye B S, Yao S X. Spatial-temporal variations of temperature and precipitation in northern China in recent 50 years. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(2): 385-390. (in Chinese)
- [3] 赵宗慈,丁一汇,徐影,张锦.人类活动对 20 世纪中国西北地区气候变化影响检测和 21 世纪预测.气候与环境研究,2003,8(1):26-34.
Zhao Z C, Ding Y H, Xu Y, Zhang J. Detection and prediction of climate change for the 20th and 21st Century due to human activity in Northwest. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(1): 26-34. (in Chinese)
- [4] 徐影,丁一汇,赵宗慈.人类活动引起的我国西北地区 21 世纪温度和降水变化情景分析.冰川冻土,2003,25(3):328-330.
Xu Y, Ding Y H, Zhao Z C. Scenario of temperature and precipitation changes in Northwest China due to human activity in the 21st Century. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(3): 328-330. (in Chinese)
- [5] 马柱国,符淙斌.1951—2004 年中国北方干旱化的基本事实.科学通报,2006,51(20):2429-2439.
Ma Z G, Fu C B. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(20):

- 2429-2439.(in Chinese)
- [6] 史玉光,孙照渤,杨青.新疆区域面雨量分布特征及其变化规律.应用气象学报,2008,19(3):326-332.
Shi Y G,Sun Z B,Yang Q.Characteristics of area precipitation in Xinjiang region with its variations.Journal of Applied Meteorological Science,2008,19(3):326-332.(in Chinese)
- [7] 董闯,粟晓玲.基于信息熵的石羊河流域降雨时空变异性研究.西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(11):222-228.
Dong C,Su X L.An entropy-based investigation into the variability of precipitation in Shiyang River Basin.Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition),2011,39(11):222-228.(in Chinese)
- [8] 栾兆擎,章光新,邓伟,胡金明,周德民.三江平原 50a 来气温及降水变化研究.干旱区资源与环境,2007,21(11):39-43.
Luan Z Q,Zhang G X,Deng W,Hu J M,Zhou D M.Study on the changes of air temperature and precipitation in the last 50 years in the Sanjiang Plain.Journal of Arid Land Resources and Environment,2007,21(11):39-43.(in Chinese)
- [9] 王英舜,贺俊杰.1961—2010 年锡林浩特地区夏季降水量特征的小波分析.草业科学,2014,31(11):2021-2025.
Wang Y S,He J J.The wavelet analysis of summer precipitation characteristics in Xilinhot from 1961 to 2010.Pratacultural Science,2014,31(11):2021-2025.(in Chinese)
- [10] 康淑媛,张勃,柳景峰,杨明金.基于 Mann-Kendall 法的张掖市降水量时空分布规律分析.资源科学,2009,31(3):501-508.
Kang S Y,Zhang B,Liu J F,Yang M J.Analysis of the spatiotemporal distribution of precipitation in Zhangye City using Mann-Kendall method.Resources Science,2009,31(3):501-508.(in Chinese)
- [11] 原立峰,杨桂山,李恒鹏,张增信.基于地统计学和 GIS 的鄱阳湖流域降雨空间差异分析.水土保持研究,2013,33(5):196-201.
Yuan L F,Yang G S,Li H P,Zhang Z X.Study on variation rule of rainfall spatial distribution in Poyang Lake basin based on geostatistic method and GIS.Research of Soil and Water Conservation,2013,33(5):196-201.(in Chinese)
- [12] 魏义长,王纪军,张芳,雷红军,徐建新.经验正交函数与地统计相结合分析降水时空变异.灌溉排水学报,2010,29(4):105-109.
Wei Y C,Wang J J,Zhang F,Lei H J,Xu J X.Using expansion of empirical orthogonal function and geostatistics to analyze temporal-spatial variability of precipitation.Journal of Irrigation and Drainage,2010,29(4):105-109.(in Chinese)
- [13] Amorocho J, Espoldora B. Entropy in the assessment of uncertainty of hydrologic systems and models. Water Resources Research, 1973, 9(6): 1515-1522.
- [14] Singh V P. The use of entropy in hydrology and water resources. Hydrological Processes, 1997, 11: 587-626.
- [15] Koutsoyiannis D. Uncertainty, entropy, scaling and hydrological stochastics. 1. Marginal distributional properties of hydrological processes and state scaling. Hydrological Sciences Journal, 2005, 50(3): 381-404.
- [16] Mishra A K, Özger M, Singh V P. An entropy-based investigation into the variability of precipitation. Journal of Hydrology, 2009, 370: 139-154.
- [17] 陈德群,朱双,严明良.国家气象中心降水数值预报信息效益评估.南京气象学院学报,1997,20(4):529-533.
Chen D Q,Zhu S,Yan M L.Assessment of information benefits of China NMC numerical prediction of rainfall.Journal of Nanjing Institute of Meteorology,1997,20(4):529-533.(in Chinese)
- [18] 王瑞燕,赵庚星,姜曙千,王媛玲,王静.基于遥感及突变理论的生态环境脆弱性时空演变——以黄河三角洲垦利县为例.应用生态学报,2008,19(8):1782-1788.
Wang R Y,Zhao G X,Jiang S Q,Wang A L,Wang J.Spatiotemporal variation of eco-environmental frangibility based on remote sensing and catastrophe theory:A case study of Kenli County in Yellow River Delta,China.Chinese Journal of Applied Ecology,2008,19(8):1782-1788.(in Chinese)
- [19] 刘丙军,陈晓宏.东江流域降水空间分布模式识别.中山大学学报(自然科学版),2009,48(5):148-152.
Liu B J,Chen X H.Mode Identification of spatial rainfall distribution in the Dongjiang basin.Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2009,48(5):148-152.(in Chinese)
- [20] 康尔泗,陈仁升,张智慧,吉喜斌,金博文.内陆河流域山区水文与生态研究.地球科学进展,2008,23(7):675-680.
Kang E S,Chen R S,Zhang Z H,Ji X B,Jin B W.Some problems facing hydrological and ecological researches in the mountain watershed at the upper stream of an Inland River basin.Advances in Earth Science,2008,23(7):675-681.(in Chinese)
- [21] 蓝永超,吴素芬,韩萍,赵琪.全球变暖情境下天山山区水循环要素变化的研究.干旱区资源与环境,2008,22(6):99-104.
Lan Y C,Wu S F,Han P,Zhao Q.Change of water cycle factors in the Tianshan mountain under global warming.Journal of

- Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(6): 99-104. (in Chinese)
- [22] 耿雷华, 黄永基, 酃建强, 陈晓燕. 西北内陆河流域水资源特点初析. 水科学进展, 2002, 13(4): 496-501.
Geng L H, Huang Y J, Li J Q, Chen X Y. Analysis on water resources characters of endorheic drainage in Northwest China. Advances in Water Science, 2002, 13(4): 496-501. (in Chinese)
- [23] 李春娥, 刘秋荣, 张丽君. 新疆 2000—2012 年 NDVI、降水和 RUE 的时空特征. 草业科学, 2015, 32(11): 1740-1747.
Li C E, Liu Q R, Zhang L J. The spatiotemporal characteristics of NDVI, precipitation and RUE during 2000—2012 in Xinjiang. Pratacultural Science, 2015, 32(11): 1740-1747. (in Chinese)
- [24] 杨莲梅, 杨青, 杨柳. 天山山区大气水分循环特征. 气候与环境研究, 2014, 19(1): 107-116.
Yang L M, Yang Q, Yang L. Characteristics of the atmospheric moisture cycle over the Tianshan mountains. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(1): 107-116. (in Chinese)
- [25] 张正勇, 刘琳, 唐湘玲. 1960—2010 中国天山山区气候变化区域差异及突变特征. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1475-1484.
Zhang Z Y, Liu L, Tang X L. The regional difference and abrupt events of climatic change in Tianshan mountains during 1960—2010. Progress in Geography, 2012, 31(11): 1475-1484. (in Chinese)
- [26] 韩添丁, 丁永建, 叶柏生, 谢昌卫. 天山天格尔山南北坡降水特征研究. 冰川冻土, 2004, 26(6): 761-766.
Han T D, Ding Y J, Ye B S, Xie C W. Precipitation variations on the southern and northern slopes of the Tianger range in Tianshan mountains. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(6): 761-766. (in Chinese)
- [27] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 王怀军, 方功焕. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展. 地理学报, 2014, 69(9): 1295-1304.
Chen Y N, Li Z, Fan Y T, Wang H J, Fang G H. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1295-1304. (in Chinese)
- [28] 赵传成, 丁永建, 叶柏生, 赵求东. 天山山区降水量的空间分布及其估算方法. 水科学进展, 2011, 22(3): 315-322.
Zhao C C, Ding Y J, Ye B S, Zhao Q D. Spatial distribution of precipitation in Tianshan Mountains and its estimation. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 315-322. (in Chinese)
- [29] 黄琼. 降水变异性对水文过程模拟影响研究. 南京: 河海大学硕士学位论文, 2006.
Huang Q. Impact of precipitation variability on hydrological processes. Master Thesis. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese)
- [30] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 樊自立. 新疆气候由暖干向暖湿转变的信号及影响. 干旱区地理, 2002, 25(3): 194-200.
Hu R j, Jiang F Q, Wang Y J, Fan Z L. A study on signals and effects of climatic pattern change from warm-dry to warm-wet in Xinjiang. Arid Land Geography, 2002, 25(3): 194-200. (in Chinese)
- [31] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 张国威, 丁永建, 胡汝骥, 康尔泗. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.
Shi Y F, Shen Y P, Li D L, Zhang G W, Ding Y J, Hu R J, Kang E S. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm wet in northwest China, 2003, 23(2): 152-164. (in Chinese)
- [32] 杨庆, 马柱国. 新疆不同降水观测资料的比较及其差异的可能原因. 气候与环境研究, 2014, 19(4): 452-462.
Yang Q, Ma Z G. Comparison of different precipitation observations in Xinjiang and its possible cause analysis. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(4): 452-462. (in Chinese)
- [33] 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 白云岗. 基于 Copula 函数的新疆极端降水概率时空变化特征. 地理学报, 2011, 66(1): 3-12.
Zhang Q, Li J F, Chen X H, Bai Y G. Spatial variability of probability distribution of extreme precipitation in Xinjiang. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 3-12.